

Evaluación energética de materiales y procesos en el mantenimiento de una sección de autopista en España.

Eva Martínez Caraballo⁽¹⁾, Ignacio Redruello Almandoz⁽²⁾ y Justo García Navarro⁽³⁾

(1)Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Superior de Ingenieros Agrónomos. Avenida Complutense s/n. Madrid. España. E-mail: emcaraballo@yahoo.com

(2)Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Superior de Ingenieros Agrónomos. Avenida Complutense s/n. Madrid. España. E-mail:nacho.redruello@gmail.com

(3)Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Superior de Ingenieros Agrónomos. Avenida Complutense s/n. Madrid. España. E-mail: justo.gnavarro@upm.es

RESUMEN

La evaluación energética de una autopista nos lleva a conclusiones muy interesantes sobre la importancia del correcto uso de materiales y procesos en todo su ciclo de vida. Varios estudios afirman que la etapa de mantenimiento es la que gasta más energía. (Stripple, H. 1993 y Thenoux, G *et al.*2006) Este estudio llega a cuantificar la energía consumida en los materiales y procesos, usando un ejemplo de una unidad de dos carriles de autopista, en la fase de mantenimiento.

Para realizar el estudio, se ha definido un escenario tipo, con valores medios para España. Al tener un autopista un sistema tan complejo, se ha dividido en unidades funcionales UF, con un grado menor de complejidad y con similares características morfológicas y energéticas.

Para este estudio se ha elegido la UF con mayor repercusión energética por su mayor uso en una autopista, el tronco. Formada por dos carriles por sentido, con 10m de ancho de firme y un kilómetro de medida de longitud.

El objetivo es conocer el consumo energético asociado a todos los materiales y las acciones debidas al mantenimiento y conservación de una autopista, en toda la vida útil de la infraestructura, que se estima y se justifica en 50 años.

Los resultados del estudio son bastante claros, sólo hay dos capítulos con un peso elevado en el consumo energético: iluminación con un 17% y con un porcentaje mayoritario, las reposiciones de firmes 78%.El resto de capítulos tienen un porcentaje inferior a 2%.

ABSTRACT.

The energetic evaluation of a highway leads to some interesting conclusions about the impact of proper use of materials and processes throughout their lifecycle. Several studies claim that the maintenance phase has the most energy consumption. (Stripple, H. 1993 and Thenoux, G. *et al.* 2006). This study reaches the quantification of the energy consumed in the materials and processes during the maintenance phase, using an example of a two-lane highway unit.

For the study, we have defined a scenario, with average values for Spain. Knowing that a highway is a complex system, it has been divided in small pieces called Functional Units, with a lower degree of complexity and with the same morphological and energetic characteristics.

For this study, we have chosen the UF with more energy implication of the highway. It is formed with two lanes for each direction, 10 m wide and one kilometer as the measure of length.

The final aim is to determine the energy associated with the materials and maintenance actions of a highway in the entire life of an infrastructure, estimated and justified in 50 years.

The study results are fairly clear; there are two chapters with the high energy influence: lighting 17% and with a majority, pavement rehabilitation 78%. The remaining chapters have a ratio below 2%.

Palabras clave: Eficiencia energética, autopista, acv, mantenimiento.

1_INTRODUCCIÓN

Suscitada por la noticia del cambio climático y un gran aumento del precio de los recursos de origen fósil, las llamas del debate están en su apogeo. ¿Cómo se debe manejar las necesidades de energía? Por ello se estima necesaria la emergente necesidad en todos los campos del ciclo de la energía (desde producción a consumo) de una reducción del consumo energético, asociado a una eficiencia energética de los materiales y procesos, no la supresión de los mismos.

En este proceso, lo primero que se debe hacer es conocer el balance energético real en todos los sectores de la sociedad.

La energía consumida en el transporte en Europa es el 33% del consumo energético total. Según la comisión europea, el sector del transporte es el que tiene un mayor potencial de ahorro energético, además del ahorro de emisiones de CO₂eq. Según la Agencia Internacional de la Energía, AIE, la eficiencia energética es el principal instrumento para frenar las emisiones de CO₂, por encima de la generación de energía con recursos renovables.

Tabla 1. Ministerio de industria, turismo y comercio. La energía en España 2009.

Balance Energético de la Unión Europea		
Consumo final por sectores	Mtep	
Industria	322,9	28%
Transporte	377,3	33%
Doméstico	284,6	25%
Servicios y otros	173	15%
TOTAL	1158	

En España el porcentaje es aún mayor, hasta el 38,8% en 2009.

De todo esto surge la importancia del cálculo numérico de la energía de una autopista y con ello la evaluación del ciclo de vida de las mismas. Este estudio se lleva a cabo como una herramienta de evaluación del impacto ambiental para conocer los impactos de la "cuna a la tumba" (Baumann y Tillman, 2003). Se han estudiado todas las fases del ciclo de vida (García Navarro, J. *et al.* 2010). Sin embargo, para este trabajo solo se incluye la fase de mantenimiento con el estudio energético de sus procesos y de los materiales necesarios. Se sabe que es la etapa con mayor consumo energético (Stripple, H. 1993 and Thenoux, G et al.2006) con una duración estimada de 50 años.

Se ha realizado la evaluación de un kilometro tipo de tronco de autopista llano, dos carriles e iluminación artificial, que es una de las unidades funcionales con más distancia total en recorrido.

El consumo se obtiene a partir de la energía secundaria. Una vez calculada ésta, si se quiere obtener la energía primaria consumida, hay que realizar unos coeficientes de transformación de ambas energías.

Del impacto energético del transporte en el contexto del sector europeo, las infraestructuras son un porcentaje pequeño, pero nada despreciable en valores absolutos.

2_MATERIALES Y MÉTODOS

2.1_OBJETIVO

El objetivo principal de este estudio es la evaluación y cálculo del consumo energético de todos los materiales y procesos que forman parte de la etapa de mantenimiento del ciclo de vida de una autopista. Mediante esta cuantificación energética se podrán establecer criterios de sostenibilidad que puedan ser aplicados en el desarrollo de este tipo de infraestructuras. Y sobre todo, aplicar medidas de disminución de este consumo mediante el cambio de materiales, el uso de otros procesos y el reciclaje en todas las etapas.

Esta metodología se plantea desde un punto de vista innovador, al basarse en el cálculo del balance energético de la autopista en sí misma y de todos los elementos que intervienen, en toda su dimensión y alcance.

La metodología se apoya en tres aspectos básicos desde los que afrontar el estudio en toda su complejidad. Son los siguientes: La consideración tanto de la energía consumida en el proceso (ex-energía), como la producida mediante energías renovables en el ámbito de la autopista (in-energía) (Gonzalez Diaz, M.J. *et al.* 2009), o la energía teórica que se obtiene mediante el reciclado de todos los residuos en todas las etapas, pero más concretamente en la fase de desmantelamiento. Estas infraestructuras, por lo general son consumidoras de energía, pero también es posible producir energía mediante energía renovable en emplazamientos pertenecientes a la carretera, mediante la revalorización de los residuos, etc.

Al ser un sistema complejo, es necesaria su descomposición en pequeños subsistemas o productos que faciliten la aplicación de esta metodología y que llegue a ser una herramienta de fácil acceso. Estas partes se llaman Unidades Funcionales (UF). El objetivo de esta división es conseguir un análisis y comparación, en busca de la mejor combinación de materiales y procesos, desde un punto de vista energético. Esta descomposición se realizará mediante la definición de la clasificación determinada de Escenarios y Unidades Funcionales, que se desarrolla más adelante.

La metodología utilizada se basa en la metodología estándar del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y se ha realizado de acuerdo a la norma ISO 14040. Ello permite el análisis, diagnóstico y propuestas de mejora globales de productos, procesos y servicios asociados a la autopista. Está siendo aplicada para el estudio y valoración de muchos y diversos sistemas e intenta reducir el impacto del sistema estudiado sobre el medio, y su aplicación a una infraestructura como la autopista es una novedad (García Navarro, J. *et al.* 2010).

2.2_METODOLOGIA

La investigación se ha realizado siguiendo la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (Azapagic, A. 1999), como una herramienta para analizar una infraestructura, basada en la UNE ISO 14040. Esta metodología identifica los puntos críticos de cada una de las etapas y subsistemas que constituyen el proceso global productivo.

Una visión general de un ciclo de vida de una autopista se compone de las fases de 1º_construcción, 2º_mantenimiento y 3º_deconstrucción. La fase final de una autopista es especialmente problemática. La mayoría de las carreteras no tienen un final definido en el tiempo. Al contrario, son rehabilitadas, reconstruidas o reemplazadas por una nueva carretera, mientras que la antigua carretera permanece operando. Normalmente se incluye en la fase de mantenimiento pero para este estudio se ha incluido la deconstrucción total de toda la infraestructura, para dejar el escenario igual que estaba antes de la autopista y ser fieles a la metodología escogida (Santero, N. *et al.* 2010)

Las tres fases del ciclo de vida se han estructurado en capítulos enfocados al estudio de generación y consumo de energía basados en la utilización de materiales, generación de residuos, transporte, puesta en obra y utilización de combustible. Estos capítulos se han distribuido de manera similar en las tres fases del ciclo de vida para su futura comparación entre ellos. Es importante esta comparación entre fases por capítulos para establecer posibles vínculos entre ellos y entre las fases. Esto se logra al establecer todos los capítulos tanto de obra como de conservación y mantenimiento en todas las fases.

Los capítulos de las fases de construcción y deconstrucción son similares. En mantenimiento ocurre lo mismo, añadiendo el factor periodo de tiempo, donde se incluye la duración del ACV.

2.2.1 DEFINICION DE ESCENARIOS

Conforme a los criterios anteriormente descritos, en el desarrollo del índice se ha establecido en primer lugar la diferencia entre escenarios, E y unidades funcionales, UF. Los escenarios constituyen lo que es inamovible en la autopista estudiada. Estas variables están determinadas por la ubicación y condicionantes de localización y funcionamiento de la infraestructura.

El conjunto de estas variables son consideradas como el escenario donde transcurre todo el ciclo de vida de la autopista, siendo muy importante la correcta determinación de todas las variables para un correcto análisis y comparación entre diferentes autopistas. Las variables a estudiar son la orografía del terreno, la altitud (>1.200m), la geología del terreno, las condiciones climáticas, la intensidad y tipo de tráfico, las normativas a aplicar y el grado de mantenimiento exigido.

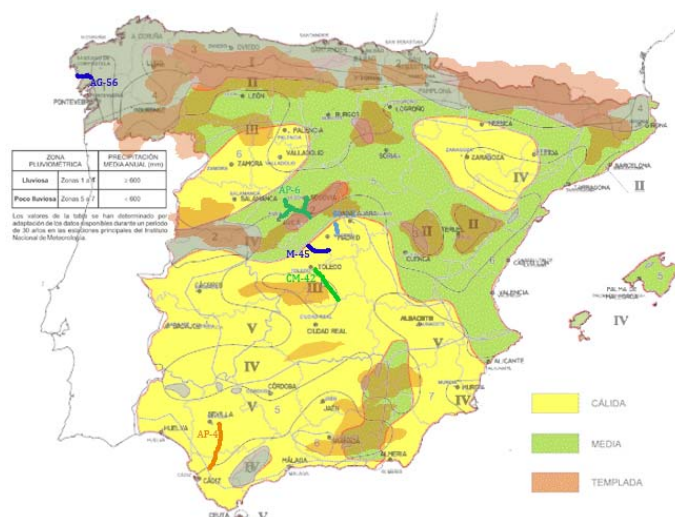


Figura 1: Escenario: Altitud >1200m, pluviometría, climatología estival y zonas climáticas de las 6 autopistas analizadas.

2.2.2 FORMACIÓN DE UNIDADES FUNCIONALES (UF)

La Norma ISO 14040 define unidad funcional como la “cuantificación de la función de un sistema del producto, servicio o actividad, que se utiliza como unidad de

referencia en el estudio de ACV". [2] En este estudio, una Unidad Funcional "UF" es cada uno de los elementos unitarios, seriados y repetibles en los que se ha despiezado la autopista, y a cada uno de los cuales se asocia un consumo energético. Estos elementos formarían parte de la decisión de diseño de la autopista, son por tanto seleccionables y decididos entre diferentes alternativas. La autopista vendrá definida por la acumulación y organización integrada de unidades funcionales.

En el caso de la autopista, las unidades funcionales se basan únicamente en su diseño geométrico, no en los materiales a usar. Estos se estudian como variables de las unidades funcionales. Sumando las UF definidas se podría componer cualquier autopista (incluyendo accesos, playas de peaje, edificio de control, túneles, puentes) que actualmente existe.

El modelo se ha realizado sobre la Unidad Funcional UF.C2.i, definida de la siguiente manera: tramo de AUTOPISTA de 1 km de longitud, en terreno llano, con firme semirrígido, para tránsito T00 (sección 0032), con iluminación. Su descripción ha sido extraída de las mediciones tipo de ingeniería civil que se incluyen en la base de datos BEDEC.

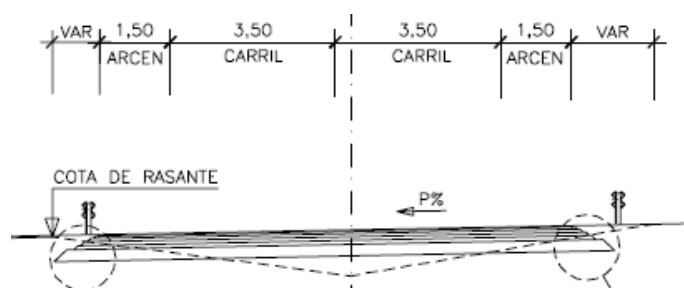


Figura 2. Sección transversal tipo de UFC2

2.2.3_DETERMINACIÓN DE DURACION FASE MANTENIMIENTO

La fase de mantenimiento tiene una duración en el tiempo, que se estima en función del capítulo de obra que más desgaste sufre, el firme sobre el que ruedan los vehículos. Según la norma española 6.1-Ic "Secciones de firme", se define vida útil del firme como el período de tiempo en el que el firme (o la capa del firme considerada) no presenta una degradación estructural generalizada. La necesidad de una rehabilitación estructural generalizada se planteará si concurre alguna de las circunstancias siguientes:

1. Agotamiento estructural del firme.
2. Previsión de crecimiento importante de la intensidad de tráfico pesado.
3. Gastos excesivos de conservación ordinaria.
4. Afección significativa a la viabilidad de las actuaciones de conservación ordinaria.

El estudio se centra en el análisis de la infraestructura viaria de autopistas en régimen de concesión, que según los pliegos de condiciones determinan un periodo concreto de concesión diferente por cada proyecto. En la mayoría de las concesiones actualmente gestionadas en España, la duración de la concesión está entre 30-35 años. Según estos pliegos, normalmente hay unas bonificaciones en

años de duración de la concesión según aproximadamente 35 indicadores de calidad de servicio. Con estos datos, la duración de la fase de mantenimiento está asegurada en al menos 35 años, en los que la infraestructura se encuentra en perfecto estado y dentro de unos parámetros generales y particulares altamente controlados. Se estima según el programa de gestión de firmes GEFIREX (está implantado en numerosas diputaciones y comunidades de España y está basado en modelos de predicción del HDM-IV), que el mantenimiento estructural del firme con los parámetros de una concesionaria se determinan en al menos 50 años para los 8 tipos diferentes de firme según la norma española PG-3, siguiendo una gestión de mantenimiento del firme adecuado, con rehabilitaciones periódicas de la capa de rodadura. En estos 50 años de vida útil se puede prever el crecimiento de la intensidad de tráfico según diferentes programas homologados de previsión de tráfico (los utilizados por los proyectistas para los concursos de concesiones).

La conservación ordinaria se mantiene hasta los 50 años casi como una constante, manteniendo una afección muy controlada a la vialidad y con unos costes de conservación previsibles y contenidos.

Según Strippel (1993), la duración de la fase de mantenimiento en un Kilómetro tipo de carretera en Suecia es de 40 años. Teniendo en cuenta los condicionantes climáticos y de desgaste de la estructura con los tratamientos de vialidad invernal, así como el menor nivel de exigencia en los indicadores de calidad ya que el estudio se centra en carreteras y no en autopistas o autovías con indicadores de calidad de la infraestructura muy controlados, se valora como válido la trasposición de 40 a 50 años en la ubicación de España.

2.2.4_ESTRUCTURA POR CAPÍTULO

Las tres fases de ciclo de vida se dividen en los mismos capítulos de obra, muy similares a los capítulos de un presupuesto tipo, que se incrementan en uno más, (vialidad) para la fase de mantenimiento.

En la fase de mantenimiento, las unidades no son las de obra, sino las mediciones obtenidas por las empresas concesionarias en el uso de las instalaciones.

Mientras que en la fase de construcción y deconstrucción, el consumo energético de la UF se obtiene mediante un sumatorio de partidas con mediciones de obra, en esta fase el cálculo de la energía asociada a las labores de mantenimiento es de más difícil elaboración, pues no todos los consumos pueden ser asociados de forma lineal a cada unidad de obra. Se incluyen en este capítulo gastos variables en función de los períodos de mantenimiento, reparación y/o reposición. Por ejemplo, consumo anual de gasoil de la maquinaria en la siega de todos los taludes, medianas y terciadas, metros cuadrados anuales de rehabilitación de firmes, metros lineales pintados, limpieza de calzada, etc.

La estructura por capítulos es la siguiente: (MT) movimiento de tierras, (CMC) Cimientos y muros de contención, (FP) firmes y pavimentos, (PS) protecciones y señalización, (DSC) drenajes, saneamiento y canalizaciones, (ILU) iluminación, (VIA) vialidad y (JAR) jardinería.

2.3_INVENTARIO

La toma de datos es fundamental para la elaboración del modelo y la verificación de éste. Los datos obtenidos del análisis se han comparado, teniendo en cuenta las diferentes variables del escenario, obteniendo datos ponderables del uso y mantenimiento en varios años consecutivos en tres ejemplos y de un solo año en los otros tres.

Se han obtenido datos relacionados con el mantenimiento de 6 autopistas españolas, facilitados por las empresas concesionarias. Estas son: M-12, AP-6, M-45, CM-42, AG-56 Y AP-4. En el gráfico [01] se pueden observar las similitudes de escenarios entre las distintas autopistas como la AP-4, M-12, M-45 y CM-42. La autopista AP-6 tiene un escenario diferente, de montaña, con más probabilidad de nieve y menor calor en verano. La autopista AG-56 tiene un escenario típico de costa del Norte de España, muy húmeda, veranos templados y con escasa probabilidad de nieve.

El escenario y las variables que lo definen son importantes en la variación de las mediciones de las tomas de datos reales tomadas en origen, ya que las variaciones en algunas partidas son considerables, en otras partidas son totalmente inapreciables.

Por lo que para obtener unos valores medios de la UF C2, se ha basado en un escenario común de las autopistas que rodean Madrid y de la AP-4 en Sevilla. Para validar datos de las otras 2 autopistas se ha realizado una ponderación por comparativa de datos.

En las 6 autopistas estudiadas, el nivel de detalle de los datos aportados por las concesionarias es muy dispar. La autopista con mayor detalle en la toma de datos es la M-12 Eje Aeropuerto, en la que se detalla la maquinaria usada en cada caso, las horas utilizadas para cada acción de mantenimiento, el consumo eléctrico por centro de transformación, las horas de iluminación artificial /año, y el consumo de combustible para algunas actuaciones como los vehículos de mantenimiento, la limpieza y siega. Por el contrario, otras concesionarias con distinta gestión, con mayor porcentaje de subcontratas en el mantenimiento, sólo han aportado datos de consumos eléctricos, y de consumos de vehículos de mantenimiento de señalización horizontal.

Los datos extraídos son procesados junto con la base de datos del ITEC- BEDEC, para determinadas actuaciones, como la gestión de firmes y mantenimiento de la infraestructura, en otras actuaciones está determinado el balance energético según las mediciones extraídas de las 6 autopistas y elaborado directamente. Los datos obtenidos se expresan en unidades que han sido elegidas en base a una aplicabilidad en el análisis de consumos energéticos.

El balance energético se toma como la energía que se emplea en las acciones de mantenimiento para cada partida.

El consumo energético de estas acciones se determina por el consumo de combustible (generalmente fuel) tanto de los vehículos de transporte como de la maquinaria en uso, incluyendo la energía embebida de la fabricación y transporte.

La medición de energía eléctrica se basa en la energía consumida en destino, a partir de las mediciones de los centros de control de las autopistas, no teniendo en cuenta la energía degradada de los procesos de transformación.

El contenido de energía en el combustible para la combustión se basa en el poder calorífico y en el consumo energético derivado de la extracción, fabricación y transporte del mismo.

Para los vehículos de mantenimiento y vehículos de carga, se supone que la operación ha tenido lugar mediante un motor diesel moderno, según modelos aportados por las concesionarias. El consumo de dichos vehículos se establece a partir de las tablas del consumo de vehículos del IDAE. Esto genera menores emisiones y bajo consumo de energía en comparación a un vehículo más antiguo y menos eficiente en las condiciones actuales.

El capítulo de MOVIMIENTO DE TIERRAS_MT supone muy poca energía respecto el total de la fase de mantenimiento, no llega a un 1%. Se ha dividido en dos partidas, de las que se han obtenido datos de las autopistas M-12, AP-4 y AG-56. La primera partida trata sobre revisiones e inspecciones visuales; en las autopistas se realizan inspecciones visuales conjuntamente para varios elementos, como estructuras, firmes, taludes, etc. La toma de datos de estas inspecciones se han generado a partir de los litros de combustible diesel de los vehículos de mantenimiento en una autopista. Este consumo se ha distribuido en todas las partidas de revisiones de mantenimiento, dando más o menos frecuencia según las horas trabajadas en cada partida, según datos en la autopista M-12.

El Consumo energético generado por estas actuaciones está considerado en el valor energético contabilizado en el litro de diesel realizado según la energía embebida en el propio combustible 40.6MJ/kg, (Ekono, 1981) con una densidad de 0.865 kg/l de diesel, son 35.1MJ/l, e incrementado con un porcentaje (10%) equivalente a la extracción y refinado del crudo (Tillman *et al* 1991).

Y la segunda consiste en una reposición de malla metálica para la protección de taludes, los datos de la autopista M-12 nos dan la reposición anual de todo el tramo, se ha repartido esta reposición entre la longitud del tramo, para conseguir una medición por año y km. El consumo energético más elevado de la partida se refiere a la construcción y puesta en obra. El material influye únicamente un 2% del total de este capítulo, correspondiente al acero de las mallas metálicas.

Tabla 2. Relación de partidas del capítulo 1.

repercusión %				0,76	
1	Ud	MOVIMIENTO DE TIERRAS	FREC./AÑO	MJ/CV	302.596,50
1.1	L	Programa de revisión de los taludes. Inspecciones visuales.	3,0		50,00
	MJ/Ud	38,61		MJ	5.791,50

1.2	m2	Protección de taludes con malla metálica, una de triple torsión, paso de malla de 50 mm y diámetro 1,5 mm, anclada con barras de acero corrugadas y sujeta con piquetas de anclaje	1,0	3,57
	MJ/Ud	72,95		MJ 260,43

El capítulo de CIMENTOS Y MUROS DE CONTENCIÓN_CMC lleva asociada menos energía que el anterior, sin llegar tampoco a un 1% del total del mantenimiento. Al igual que el anterior se divide en dos partidas, la primera igual que en el anterior capítulo y la segunda de rehabilitación del hormigón de cimentación. En esta fase, la energía embebida de los materiales, acero y hormigón, adquiere mayor importancia, suponiendo un 40% del total de este capítulo.

Tabla 3. Relación de partidas del capítulo 2.

		repercusión %			0,28
2	Ud	MUROS DE CONTENCIÓN 10%	FREC./AÑO	MJ/CV	113.640,50
2.1	L	Programa de revisión de los muros de contención. Inspecciones visuales.	1,0		27,30
	MJ/Ud	38,61		MJ	1.054,05
2.1	m2	Rehabilitación muro placas prefab.horm.arm.p/armar terrap.h=6-9m	1,0		2,00
	MJ/Ud	609,38		MJ	1.218,76

El capítulo de FIRMES Y PAVIMENTOS_FP tiene una repercusión sobre el total del mantenimiento de un 78%. Se ha dividido en dos subcapítulos, la explanada y la calzada. Siendo la calzada la más influyente energéticamente. Esto es debido a su mayor necesidad de reposición del firme durante el ciclo de vida de la autopista. Los materiales utilizados en el firme, suponen un 98% de la energía total del firme 0032.

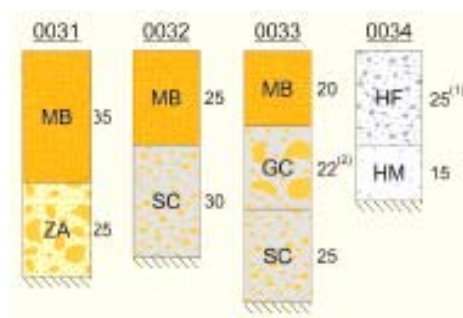


Figura 3: Secciones y espesores de capa de firme según la Norma 6.1 Secciones de firme, de la instrucción de carreteras (BOE de 12 de diciembre de 2003). MB_mezcla bituminosa. SC_Suelocemento. ZA_Zahorra. GC_gravacemento. HF_Hormigón de firme. HM_Hormigón magro vibrado.

En la acción de reposición del firme se ha tenido en cuenta el consumo energético de la maquinaria y el transporte de la misma, durante las acciones de fresado y de reposición de la capa de rodadura.

Del catálogo de la norma, se ha seleccionado la sección de firme 0032 (Suelocemento y mezcla bituminosa), para la categoría de tráfico pesado T00 (más de 4000 vehículos pesados/día) en función del tipo de explanada E3(más de 300

MPa). En esta norma se define la sección mínima a rehabilitar, y las especificaciones necesarias para una autopista, estos mínimos se toman como valores de referencia por las empresas concesionarias, así en el estudio se toman las dimensiones de cada capa de la norma como válidos.

Tabla 4. Relación de partidas del capítulo de firmes y pavimentos.

3	Ud	FIRMES Y PAVIMENTOS	FREC./AÑO	MJ/CV	31.214.494
3.1	MJ	EXPLANADA		MJ/ CV	60.084,50
3.1	L	Programa de revisión de los muros de contención. Inspecciones visuales.	1,0		27,30
	MJ/Ud	38,61			1.054,05
3.1	m2	Reformación de explanada E3-6,	1,0		1,00
	MJ/Ud	147,64			147,64
3.2	MJ	CALZADA		MJ/ CV	31.154.410
3.2.1	MJ	FIRME		MJ/ CV	26.125.610
		Reposición frecuente o programada de firme 0032. Bacheado, Pavimento de mezcla bituminosa continua en caliente de composición gruesa G-20 con árido calcáreo y betún asfáltico de penetración, extendida y compactada al 98 % del ensayo marshall	1,0		31,00
3.2.1.1	m2				
	MJ/Ud	326,20		MJ	10.112,20
		Gran reposición del carril derecho, vehículos pesados, cada 7- 10 años aproximadamente. Pavimento 0032 de mezcla bituminosa continua en caliente de composición gruesa G-20 con árido calcáreo y betún asfáltico de penetración, extendida y compactada al 98 % del ensayo marshall con IRI inicial de 1,2, fresado de la mezcla bituminosa, Transporte de residuos a centro de reciclaje, a monodépósito, a vertedero específico o a centro de recogida y transferencia, con camión de 7 t y tiempo de espera para la carga a máquina, con un recorrido de 20 km.	1,0		3.750,00
3.2.1.2	m2				
	MJ/Ud	108,37		MJ	406.387,50
		Gran reposición del carril izquierdo, vehículos ligeros, cada 7- 10 años aproximadamente. Pavimento 0032 de mezcla bituminosa continua en caliente de composición gruesa G-20 con árido calcáreo y betún asfáltico de penetración, extendida y compactada al 98 % del ensayo marshall con IRI inicial de 1,2, fresado de la mezcla bituminosa, Transporte de residuos a centro de reciclaje, a monodépósito, a vertedero específico o a centro de recogida y transferencia, con camión de 7 t y tiempo de espera para la carga a máquina, con un recorrido de 20 km.	1,0		3.750,00
3.2.1.2	m2				
	MJ/Ud	28,27		MJ	106.012,50
3.2.2	MJ	ARCÉN		MJ/ CV	5.028.800,00
		Reposición frecuente o programada de firme 0032. Bacheado, Pavimento de mezcla bituminosa continua en caliente de composición gruesa G-20 con árido calcáreo y betún asfáltico de penetración, extendida y compactada al 98 % del ensayo marshall	1,0		5,00
3.2.1.1	m2				
	MJ/Ud	326,20		MJ	1.631,00
		Gran reposición, Pavimento de mezcla bituminosa continua en caliente de composición gruesa G-20 con árido calcáreo y betún asfáltico de penetración, extendida y compactada al 98 % del ensayo marshall, fresado de la mezcla bituminosa, Transporte de residuos a centro de reciclaje, a monodépósito, a vertedero específico o a centro de recogida y transferencia, con camión de 7 t y tiempo de espera para la carga a máquina, con un recorrido de 20 km.	1,0		3.500,00
3.2.1.2	m2				
	MJ/Ud	28,27		MJ	98.945,00

En este capítulo es muy importante el sistema de gestión de la conservación del firme con una programación temporal de actuaciones a realizar. En la gestión se

observa como partida más importante, la acción de gran reposición periódica, que se ha establecido en un periodo entre 7 y 15 años. Se estudia la gestión del carril de vehículos pesados, el carril de vehículos ligeros y del arcén por separado ya que existen diferencias de diseño y en el consumo energético de cada actuación por unidad de superficie.

Tabla 05. Consumo energético de cada capa por materiales y procesos de la sección de firme 0032.

sección	0032			
pavimento	mezcla bituminosa en caliente (25 cm)			
	M-10__			
capa de rodadura	discontinua (3cmc.rodadura) 3 cm	m2	Pavimento de mezcla bituminosa discontinua en caliente de composición M-10 con árido granítico y betún asfáltico de penetración, para una capa de rodadura de 3 cm de espesor	
			Componentes constitutivos de materiales	69 161,98
			árido	65,55 9,83
			betún asfáltico	3,45 152,15
			Componentes constitutivos de maquinaria	- 1,66
			gasoil	- 1,66
			Total	69 163,63
			kg	MJ
	S-25__mezcla bituminosa en caliente (35cm-rodadura) 22 cm	t	Base de mezcla bituminosa en caliente, de composición semidensa S-25, con árido granítico y betún asfáltico de penetración, extendida y compactada al 98 % del ensayo marshall	
capa intermedia			Componentes constitutivos de materiales	1.000,00 1.908,00
			árido	960 144
			betún asfáltico	40 1.764,00
			Componentes constitutivos de maquinaria	- 21,56
			gasoil	- 21,56
			Total	1.000,00 1.929,56
			kg	MJ
base	suelo - cemento 30 cm	m3	Base de suelo-cemento SC20 o SC40 elaborada en la obra, con cemento CEM II/B-L o CEM III/B o CEM IV/B 32,5 N, colocada con extendidora y compactado del material al 98% del PM	
			Componentes constitutivos de materiales	1.285,00 515,36
			agua	140,5 0,84
			árido	1.050,00 157,5
			cemento	94,5 357,02
			Componentes constitutivos de maquinaria	- 49,47
			eléctrica	- 2,73
			gasoil	- 46,74
			Total	1.285,00 564,83
			kg	MJ
		TOTAL 0032	Componentes constitutivos de materiales	880,5 1.189,72
			agua	42,15 0,25
			árido	788,14 118,22
			betún asfáltico	21,86 964,14
			cemento	28,35 107,11
			Componentes constitutivos de maquinaria	- 26,05
			eléctrica	- 0,82
			gasoil	- 25,23
		m2	Total	880,5 Kg 1.215,76

Como ya se ha contado en el capítulo de determinación de la duración de la fase de mantenimiento, se estima que durante 50 años, el firme necesita tareas de rehabilitación superficial de manera general, y es a la terminación de esta fase cuando es necesaria una rehabilitación total de la sección de firme.

Tabla 6. Relación de espesor necesario de reposición y el año de reposición en carril de pesados de Intensidad media diario (IMDp) 5000.

Conservación	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
Reposición e=cm.	8							8							8			
Fresado min. e=cm.	3							3							3			
15	16	17	18		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
							5							18				
							3							3				
33	34	35	36		37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	
																		</

El número de rehabilitaciones del carril de los vehículos ligeros se determina a partir de las actuaciones sobre el carril de pesados, ya que al realizar una gran reposición de éste, se debe realizar en toda la sección, carril de pesados, carril de ligeros y arcén.

Ésta se compone de la realización de un fresado mínimo de 3 cm. Y una reposición de capa de rodadura del mismo espesor, para igualar con el nivel del carril de pesados.

Esta metodología de cálculo, determina los materiales, estudia la sección y espesores de cada capa, realizado con el programa de gestión de firmes GEFIREX la hipótesis de rehabilitación del firme.

El capítulo de PROTECCIONES Y SEÑALIZACIÓN_ PS tiene una repercusión sobre el total del mantenimiento de un 1,32%. Se ha dividido en tres partidas siendo la señalización horizontal la más influyente energéticamente. Esto es debido a su mayor necesidad de reposición durante el ciclo de vida de la autopista. Centrándonos solo en los materiales utilizados, destaca la cantidad de esmalte de pintura de la primera partida, que supone un 80% de la energía total del capítulo. El acero para la reposición de las señales es un 3% por su escasa necesidad de cambio, y el cemento y árido para las barreras rígidas no llega ni a un 1%. La energía restante de esta partida, 16%, va asociada a los procesos de puesta en obra y ejecución y carburante.

Tabla 07. Relación de partidas del capítulo 4.

<i>repercusión %</i>				1,32	
4	Ud	PROTECCIONES Y SEÑALIZACIÓN		MJ/CV	528.786,50
4.1		SEÑALIZACIÓN HORIZONTAL		MJ/CV	436.098,00
4.1.1	m2	Pintado sobre pavimento de bandas superficiales, con pintura reflectante y microesferas de vidrio, con máquina de accionamiento manual	1,0		156,00
	MJ/Ud	55,91		MJ	8.721,96
4.2		SEÑALIZACIÓN VERTICAL		MJ/CV	84.371,00
		Sustitución de señales de tráfico, Placa lám.reflect.nivel 1			0,25
4.2.1	Ud.	intens., 90x90cm, fij.mecánicamente, Soporte rect., tubo acero galv. 100x50x3mm, hormigonado	1,0		
	MJ/Ud	1.262,62		MJ	315,66
4.2.1	m2	Limpieza de carteles en paneles de aluminio extrusionado o laminas de acero galvanizado	1,0		26,00
	MJ/Ud	52,76		MJ	1.371,76
4.3		BALIZAMIENTO Y BARRERAS		MJ/CV	8.317,50
4.3.1	ml	Barrera rígida en forma de media campana de caras rectas, tipo New Jersey, elaborada "in situ".	1,0		0,42
	MJ/Ud	396,07			166,35

El capítulo de DRENAJES, SANEAMIENTO Y CANALIZACIONES_ DSC supone únicamente un 0,19% del total del mantenimiento. Primeramente existe una partida de inspecciones visuales y un programa de revisión con periodicidad anual, similar al de las partidas anteriores.

A este le siguen tres capítulos con la distribución energética que se ve en la tabla, donde destaca la partida de rehabilitación de los drenajes de hormigón transversales. La energía asociada a los materiales empleados supone un 80% del total energético de este capítulo. En la partida de drenaje longitudinal, el árido y el PVC utilizados suponen un 6%, mientras que en las canalizaciones de servicio los mismos materiales suponen un 24%. Para el drenaje transversal se utiliza acero y hormigón con una mayor influencia, del 50%. Y queda un 20% asociado a los procesos.

Tabla 08. Relación de partidas del capítulo 5.

<i>repercusión %</i>				0,19	
5		DRENAJES, SANEAMIENTOS Y CANALIZACIONES		MJ/CV	74.194,00
5.1.1	L	Programa de revisión del sistema de drenaje, saneamiento y canalizaciones. Inspecciones visuales.	1,0		3,00
	MJ/Ud	38,61		MJ	5.791,50
5.2		DRENAJE LONGITUDINAL		MJ/CV	6.002,00
5.2.1	ml	Rehabilitación drenaje tubo PVC relleno 50cm encima	1,0		1,00
	MJ/Ud	120,04		MJ	120,04
5.3		DRENAJE TRANSVERSAL		MJ/CV	44.433,50
5.3.1	ml	Rehabilitación tubo horm.arm.DN=1800mm,cl.3, unión campana,fondo zanja	1,0		0,05
	MJ/Ud	17.773,32			888,67
5.4		CANALIZACIONES DE SERVICIO		MJ/CV	17.967,00
5.4.1	ml	Rehabilitación canalización 12tubos polietileno, DN=40mm,relleno arena	1,0		1,00
	MJ/Ud	359,34		MJ	359,34

Este capítulo de ILUMINACIÓN_ ILU es el segundo más influyente energéticamente en el total del mantenimiento, con un 16% sobre el total. Se divide en 3 partidas, el mantenimiento de la instalación eléctrica, del cableado y el consumo realizado.

Dentro de este gran gasto, el mayor porcentaje se lo lleva el uso de las luminarias nocturnas, con un 98% del consumo total. Este consumo se ha establecido en base al número de horas sin iluminación natural (horario nocturno), más las horas de días sin iluminación natural suficiente. Multiplicando estas horas de utilización/año por la potencia instalada y suponiendo que siempre están todas las luminarias en uso, se obtienen los MJ/Ud. La luminaria elegida es de Vapor de Sodio de Baja presión, muy usuales en las luminarias de infraestructuras. Comparando el dato teórico del consumo con el dato real de las concesionarias, se ve que la variación va a ser menor del 10%.

En cuanto a la energía asociada a los materiales, en este capítulo es poco significativo comparándolo con el uso de la iluminación. Queda reducido a solo un 1%.

Tabla 09. Relación de partidas del capítulo 6.

<i>repercusión %</i>				16,52	
6	ILUMINACIÓN			MJ/CV	6.611.746
6.1	Ud.	Consumo de utilización de luminarias viales, cubeta vidr., vap. Na pres. alta 400W.	1,0		15,50
	MJ/Ud	8.409,60		MJ	130.348,80
6.2	Ud.	Reparación de luminarias y reposición de lámparas viales, cubeta vidr., vap. Na pres. alta 400W.	1,0		1,00
	MJ/Ud	1.261,00		MJ	1.261,00
6.3	m	Mantenimiento de conductor Cu, UNE RZ1-K (AS) 0,6/1 kV, baja emisión humos, 3x25mm ² ,	1,0		2,00
	MJ/Ud	312,56		MJ	625,12

En el capítulo de VIALIDAD_VIA tiene una repercusión de un 2,35% sobre el total del mantenimiento. Incluye las actividades destinadas a hacer posible el mantenimiento del servicio en todas las estaciones. La primera de ellas cuenta la energía que suponen las acciones de vialidad invernal tanto preventivas como curativas, consistentes en el rociado de salmuera en la época invernal, suponiendo una media de 10 recorridos anuales.

La segunda partida cuenta la energía que supone la vigilancia y atención de incidentes. Para estas acciones, se tienen como datos los litros de combustible de los vehículos de mantenimiento, así como las horas de uso de vehículos de vigilancia y mantenimiento. El cálculo energético se ha realizado mediante una distribución de kilómetros anuales de uso de un vehículo y el consumo de combustible realizado.

Los datos se han obtenido de las autopistas M-12 y AP-6.

En cuanto a la energía embebida de los materiales, en esta partida no existen partidas de materiales

Tabla 10. Relación de partidas del capítulo 7.

<i>repercusión %</i>				2,35	
7	VIALIDAD			MJ/CV	938.918,50
7.1	Kms/UF	Tratamiento preventivo y/o curativo con maquinaria quitanieves rociado de salmuera y cloruro sódico.	1,0		10,00
	MJ/Ud	669,19		MJ	6.691,90
7.2	Ud.	Vigilancia y atención de accidentes e incidentes	1,0		1,00
	MJ/Ud	12.086,47		MJ	12.086,47

En el capítulo de JARDINERÍA Y LIMPIEZA_JAR, su repercusión es menor de 1%. Se realiza una limpieza general, conservación y riego de jardines con una periodicidad anual. Para la primera partida se estudia el gasto de combustible anual, en litros, por km de limpieza a realizar. Estos datos se han obtenido las autopistas M-12, AP-6 y AP4. En las acciones de siega y poda ocurre lo mismo; el cálculo energético se contabiliza con la cantidad de litros de combustible por los km de siega de márgenes, medianas e isletas que hay que realizar.

Tampoco en esta partida se utilizan materiales en la fase de mantenimiento.

Tabla 11. Relación de partidas del capítulo 8.

<i>repercusión %</i>				0,60	
8	JARDINERÍA			MJ/CV	240.115,50
8.1	L	Limpieza general y conservación y riego de jardines	1,0		14,25
	MJ/Ud	38,61		MJ	550,19
8.2	Ud.	Utilización de bolsas de polietileno de baja densidad.	1,0		166,67
	MJ/Ud	3,30		MJ	550,01
8.3	L	Acciones de siega y poda	1,0		110,13
	MJ/Ud	38,61		MJ	4.252,12

3.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En esta fase del ciclo de vida de una autopista existen capítulos con mucha repercusión y otros con una repercusión muy baja.

Los capítulos con mayor carga energética son los de FP_Firmes y pavimentos, con un 78% y el capítulo ILU_ Iluminación, con un 17,84%. Estos dos capítulos suponen un 95% del total y por ello tienen el mayor potencial de reducción energética. Los demás tienen influencias menores por debajo de un 4%.

Energéticamente, el capítulo de mayor impacto es el de firmes y pavimentos, con un porcentaje muy superior sobre los demás. De este capítulo se ha descubierto la importancia e influencia energética que tiene la gestión y la normativa a aplicar sobre el mantenimiento de firmes y por consiguiente el consumo energético del capítulo. La gran influencia de este capítulo es debida, fundamentalmente, a los cincuenta años de duración de esta fase. Es el tiempo estimado de vida de la infraestructura hasta que sea necesaria una gran reconstrucción de la base del firme. En estos cincuenta

años, se establecen periódicamente unas acciones para que la capa de rodadura siga siendo operativa y que cumpla con los indicadores impuestos por las administraciones en los pliegos de condiciones.

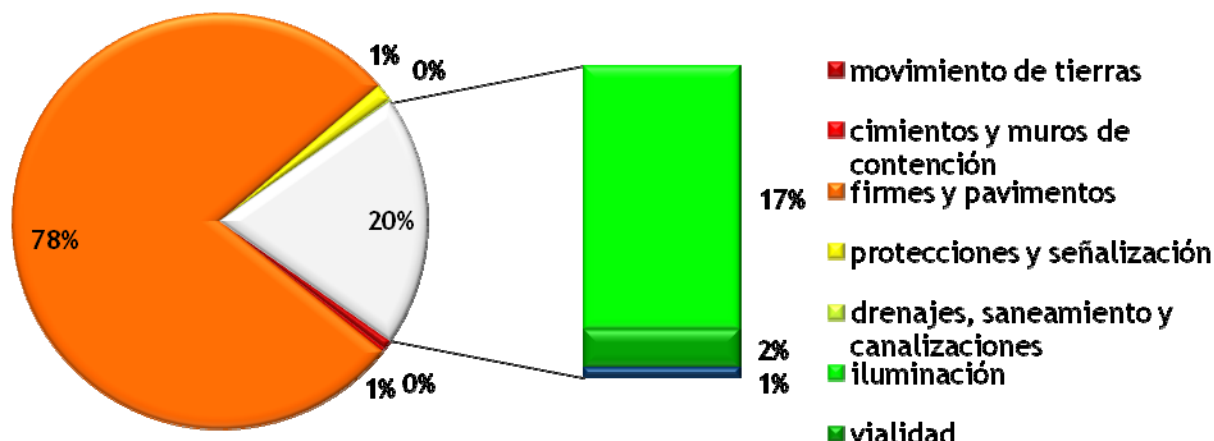


Figura 4. Porcentaje de consumo energético de los capítulos de la fase de mantenimiento.

La influencia de los materiales en una etapa de mantenimiento se suponía poco importante, sobre todo comparándola con la influencia de los mismos en una etapa de construcción. En esta segunda etapa, las partidas son de vigilancia y mantenimiento, lo que presupone un gasto reducido de materiales. Efectivamente en la gran mayoría de las partidas la influencia de los mismos es menor de un 1% por la escasa necesidad de los mismos. Pero sorprendentemente, llegan a adquirir una importancia relevante en el cómputo total de la fase ya que son responsables de un 65% de la energía total de la etapa. Existen tres capítulos, firmes y pavimentos, protección y señalización y drenajes, donde la influencia es destacable. El primero con un 95% dentro del propio capítulo, el segundo con un 83% y el tercero con un 81%. Los dos últimos capítulos, al tener poca influencia sobre el total de la fase de mantenimiento, su influencia sobre el total no pasa de un 2%. Pero respecto a los materiales utilizados en el capítulo de mantenimiento y reposición de firmes, la influencia es de más de un 75% sobre el total. Esto marca y justifica la importancia de los áridos, bitúmenes y cemento frente a la energía consumida en labores de mantenimiento debida al combustible consumido por los vehículos.

4_ CONCLUSIONES

Se ha seguido la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, con la definición de escenario y una división del sistema en unidades funcionales. De todas ellas se ha elegido una unidad funcional concreta, la UF.C2 de tronco de autopista con dos carriles, por ser la más repetitiva y representativa de los consumos energéticos globales de una autopista en servicio.

Habiendo definido la UF y las variables del escenario, se ha conseguido obtener la huella energética, durante los 50 años de uso de la infraestructura. La fase de mantenimiento de la UFC2i en estudio, tiene un consumo energético muy

importante, de 40.024,49 GJ. Si lo comparamos con el consumo medio anual de una vivienda en España, según el IDAE (1,1 tep = 44GJ/año), el mantenimiento anual de un kilómetro de esta UF al año (800,48GJ/año) se iguala con 18 viviendas tipo españolas. Esto marca la importancia energética que tienen las infraestructuras sobre la energía consumida de un país.

Según el Ministerio de Fomento en España existen 14.797 Km de autopistas o autovías de 2 carriles en 2007, según el consumo energético teórico son 11.837.600 de GJ/año, que equivale al 7.6% de la producción eléctrica eólica en 2010 en España.

Este estudio energético, deja muy claro en qué capítulos y en qué materiales está el mayor consumo de energía. Y es en ellos donde se encuentran los mayores potenciales ahorro. Sobre todo en el capítulo de firmes y pavimentos, que supone el 78% del total, con el mayor uso de materiales sobre los que habría que aplicar medidas de mejora que ayuden a reducir su energía.

En este estudio, se ha determinado únicamente una parte de todo el complejo sistema de UF de las que consta una autopista. Para abordar realmente el balance energético de una infraestructura, hay que realizar este estudio con el total de Unidades funcionales.

5_BIBLIOGRAFÍA

Azapagic, A., (1999) Life Cycle Assessment and its application to process selection, desing and optimisation. *Chemical Engineering Journal*, 73, 1-21.

BEDEC (Institut de Tecnologia de la Construccio de Catalunya).
<http://www.itec.es/nouBedec.e/presentaciobedec.aspw>

Ekono. (1981). Report on energy use of peat. Contribution to U.N. *Conference on New and Renewable Sources of Energy*, Nairobi.

García Navarro, J., Gonzalez Díaz, M. J.; Martinez-Caraballo, e., Redruello, I., (2010) Indicator of energy efficiency applied to motorways. A first step: functional unit's lca. *Urban Environmental Pollution*. Boston.

Gonzalez Díaz, M. J.; García Navarro, J. (2009) "Criteria and methodology for an indicator of energy applied to motorways". *Second International Conference Ravage of the Planet 2009*. Wessex Institute of Technology & Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), South Africa, Cape Town, ISBN: 978-1-84564-204-4.

Kraemer, C.; Pardillo, J.M. Rocci, S. Romana, M.G. Sánchez Blanco, V. del Val, M.A. (2004). *Ingeniería de Carreteras. 2 volúmenes*. Ed. McGraw-Hill. Madrid.

MacKay, D. (2008). *Sustainable Energy – Without the hot air*. *UIT Cambridge*. ISBN 978-0-9544529-3-3.

Royal institute of technology KTH (2005). *Life cycle assessment of road maintenance works in Sweden*. Estocolmo, Suecia. 13p.

Santero, N., Masasnet, E., Horvath, A., (2010) *Life Cycle Assessment of Pavements: A critical review of existing literature and research*. *Lawrence Berkeley National Laboratory Publication*. University of California.

Stripple,h.(1993). *Life cycle assessment of road. A pilot study for inventory analysis*. IVL *Swedish environmental research institute*. Goteborg, Suecia.

Thenoux, G. Gonzalez, A. Dowling, R. (2006). *Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile*. *Resources, Conservation and Recycling* 49 (2007) 325–339. Chile.

Tillman, A.-M., Baumann, H., Eriksson, E. y Rydberg, T. (1991): *Análisis del ciclo de vida de materiales de envase. Cálculo de la carga medioambiental*. SOU 1991:77. General de Publicaciones, Estocolmo

UNE-EN ISO 14041. (1998). “Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Definición del objetivo y alcance y el análisis del inventario”.

UNE ISO 14040. (1997). “Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y Estructura”.